

НЕКОТОРЫЕ СТАТИСТИЧЕСКИЕ АЛГОРИТМЫ ДИАГНОСТИКИ УЗКОПОЛОСНЫХ КОЛЕБАНИЙ В ПРОТОЧНЫХ КАМЕРАХ СГОРАНИЯ. I. ТЕОРИЯ

В. В. Белый, А. П. Рябцев, В. В. Соловьев, А. Ф. Хижун
(Москва)

Цель работы связана с общей задачей повышения информативности экспериментальных исследований процессов в проточных камерах сгорания.

Основным средством контроля таких процессов чаще всего служат малоинерционные датчики давления. На стационарных режимах подачи топлива получаемые от них сигналы после исключения постоянной составляющей обычно (за исключением случаев развитого вибрационного горения) имеют шумоподобный вид. Соответствующие спектры мощности представляют собой суперпозицию широкополосного шумового фона и некоторого числа пиков с различными центральными частотами. Последние соответствуют различным формам узкополосных колебаний. Первоначальная задача настоящей работы состояла в том, чтобы выяснить физическую природу названных узкополосных колебаний и научиться извлекать из них полезную информацию об устойчивости горения. В основу исследования положены некоторые результаты теории шумов [1—4]. В итоге созданы оптимизированные алгоритмы анализа сигналов датчиков давления, которые обеспечили существенное повышение информативности данного диагностического канала.

Классификация узкополосных колебаний в проточных камерах сгорания

Настоящая классификация базируется на результатах систематических исследований узкополосных шумов в проточных камерах сгорания различных типов — от лабораторных горелок до жидкостных ракетных двигателей (ЖРД). Наблюдаемые во всех случаях узкополосные шумы удается разделить на три основных класса по признаку механизмов их генерирования:

а) узкополосные шумы с линейно-стационарным механизмом формирования из широкополосного фона турбулентности («линейные узкополосные шумы» — класс ЛУШ);

б) узкополосные колебания, механизмы которых существенно нелинейны и (или) нестационарны («линейные узкополосные шумы» — класс НУШ);

в) вынужденные периодические колебания на гармониках роторной частоты турбины и (или) лопастных компрессоров в системе подачи топлива («гармоники роторной частоты» — класс ГРЧ).

Теоретическое описание шумов класса ЛУШ строится на основе известных положений статистической динамики [4] с учетом специфики формирующего объекта — проточной камеры сгорания в совокупности с системой подачи топлива. В качестве модели первого приближения рассматривают динамически устойчивую систему, состоящую из линейных стационарных, линейно- и стационарно-связанных подсистем с сосредоточенными и распределенными параметрами. Турбулентность течений в камере сгорания и в системе подачи для модели первого приближения учитывают в форме сосредоточенных и распределенных источников стационарного «белого шума». Пусть в некоторой точке такой модели измеряется ее реакция на совокупность действующих случайных возмущений. Обозначим через $x(t)$ сигнал соответствующего датчика. Используя известные положения теории [4], можно доказать следующее утверждение.

Если подвергнуть сигнал $x(t)$ корреляционному преобразованию

$${}^T R_{xx}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) x(t - \tau) dt,$$

то с ростом времени осреднения T результат сходится по вероятности к корреляционной функции следующего вида:

$$R_{xx}(\tau) = \sum_{i=1}^{\infty} A_i e^{-\beta_i |\tau|} \cos \omega_i \tau. \quad (1)$$

Здесь β_i и ω_i совпадают соответственно с действительной частью и коэффициентом при мнимой части i -го корня характеристического уравнения данной системы. По физическому смыслу величины ω_i представляют собой частоты собственных колебаний в системе, а β_i — соответствующие им показатели затухания. Среди членов суммы (1) могут быть и чисто экспоненциальные (соответствующие $\omega_i = 0$). Все β_i и ω_i инвариантны относительно места установки прибора; коэффициенты A_i не обладают этим свойством.

Спектр мощности сигнала $x(t)$ можно вычислить, выполняя почленно преобразование Фурье от выражения (1) и суммируя результаты [1—4]. При этом каждому экспоненциально-гармоническому члену суммы (1) в спектре мощности будет отвечать пик на частоте ω_i . Форма пика совпадает с таковой для квадрата модуля комплексной частотной характеристики линейного избирательного звена 2-го порядка. Преобразование Фурье от чисто экспоненциальных членов суммы (1) приводит к широкополосным — монотонно убывающим с ростом ω компонентам спектра, каждая из которых соответствует квадрату модуля комплексной частотной характеристики линейного релаксационного звена 1-го порядка. Наибольшее отличие данной модели первого приближения от рассматриваемых реальных объектов состоит в том, что спектральные характеристики действующих турбулентных возмущений, как и любые реальные шумы, не отвечают понятию «белый шум». Если изменениями спектральной плотности можно пренебречь в пределах эффективной полосы частот данного пика, то соответствующий ему член суммы (1) сохраняет экспоненциально-гармонический вид с теми же самыми значениями ω_i и β_i . Это всегда справедливо применительно к спектральным пикам, для которых $\beta_i/\omega_i \ll 1$. Они и определяются здесь как спектральные составляющие класса ЛУШ. Статистические свойства подобных узкополосных шумов отвечают понятию «стационарный нормальный узкополосный шум» [1—4].

Механизмы генерирования шумов класса НУШ составляют обширное множество, очертить которое сколько-нибудь определенно невозможно. На практике наиболее распространены автоколебания, предельный цикл которых возмущен динамически (турбулентными пульсациями) или параметрически.

Узкополосные колебания класса ГРЧ представляют собой реальность, с которой необходимо считаться при диагностике горения в камерах, соединенных с лопастными агрегатами. Такие колебания с диагностической точки зрения являются помехой, особенно существенной, когда частота сигнала класса ГРЧ лежит в окрестности той или иной собственной частоты системы. В подобных случаях сигнал помехи нередко становится преобладающим в соответствующей области частот благодаря резонансным явлениям и его легко спутать с вибрационным горением.

Широкополосный шум, порождаемый, наряду с турбулентностью, самой измерительной аппаратурой, представляет собой еще один тип помех, затрудняющих диагностику.

Перечень разрешимых диагностических задач¹

Общая задача диагностики распадается здесь на ряд частных.

1. Если камера сгорания соединена с лопастным агрегатом — распознавание помех класса ГРЧ в составе сигнала датчика и их подавление.
2. Разрешение альтернативы ЛУШ — НУШ применительно к отдельным пикам в спектре сигнала, не принадлежащим классу ГРЧ.
3. Если установлена принадлежность спектрального пика классу ЛУШ — оценка соответствующего показателя затухания β .
4. Если спектральный пик принадлежит классу НУШ — вынесение суждения о качественном характере относительно конкретного механизма генерирования данных узкополосных колебаний¹.

Методика распознавания и подавления помех класса ГРЧ

Основу соответствующего алгоритма (рис. 1) составляет операция выделения периодического, полигармонического в общем случае сигнала класса ГРЧ из шумов давления. Выделенные периодические колебания вычитаются из суммарного сигнала, чем достигается подавление помехи.

Ясно, что такой алгоритм может быть эффективен лишь при условии, что обеспечены равенство по амплитудам и синфазность всех выделенных гармоник класса ГРЧ относительно таковых в составе исходного сигнала. Удовлетворить этому требованию одновременно для всех гармоник в рабочем диапазоне частот датчика позволяет известный в теории выявления скрытых периодичностей прием [5]. Он основан на так называемом когерентном накоплении детерминированной части повторяющегося процесса при наличии аддитивного шума. В практических исследованиях, имеющих систематический характер, для данной цели наиболее предпочтительно пользоваться специализированным устройством, способным выдавать результаты в натуральном масштабе времени эксперимента. Принцип действия такого устройства иллюстрирует рис. 2.

Сигнал датчика давления 1 через зарядно-разрядный резистор 2 подводится к набору интегрирующих ячеек, каждая из которых содержит электронный ключ 5 и конденсатор 6. На вход 7 подан импульсный сигнал от вспомогательного датчика оборотов вала лопастного агрегата. Сигнал поступает на основной вход регистра сдвига 8 непосредственно и на сдвиговые входы через умножитель частоты импульсов 9. Коэффициент умножения частоты равен числу ячеек N . Выход схемы 4 соединен с интегрирующими ячейками через буферный усилитель 3, коэффициент передачи которого равен единице. Электронные ключи замыкаются и размыкаются последовательно под действием управляющих импульсов от регистра сдвига. Электронный ключ первой ячейки замыкается всякий раз в момент поступления очередного импульса на вход 8, второй ячейки — спустя время, равное одной N -й части от периода вращения ротора лопастного агрегата, и т. д. Момент замыкания каждого из ключей все время соответствует определенной фазе основного тона колебаний класса ГРЧ в составе сигнала датчика давления. Поэтому в установившемся режиме потенциал на каждом конденсаторе представляет собой сумму сигнала класса ГРЧ для данной фазы колебаний и потенциала ошибки. Последняя возникает ввиду наличия в составе сигнала датчика узкополосных и широкополосных колебаний, некогерентных вращению ротора. Интегрирование знакопеременного сигнала ошибки показывает, что ее уровень на выходе прибора тем меньше, чем больше постоянная времени когерентного накопления $\Theta = NRC$, где R — сопротивление резистора 2; C — емкость конденсатора 6.

Таким образом, сигнал на выходе схемы рис. 2 с точностью до упомянутой ошибки представляет собой ступенчатую аппроксимацию состав-

¹ Тривиальный случай развитого вибрационного горения с формой колебаний, близкой к гармонической, естественно, не требует подобного исследования.

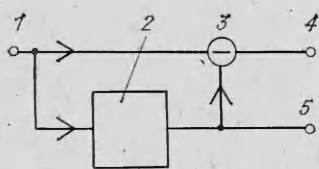


Рис. 1. Блок-схема распознавания и подавления помех класса ГРЧ.
1 — вход; 2 — фильтр гармоник роторной частоты; 3 — блок вычитания; 4 — выход «очищенного» сигнала; 5 — выход сигнала класса ГРЧ.

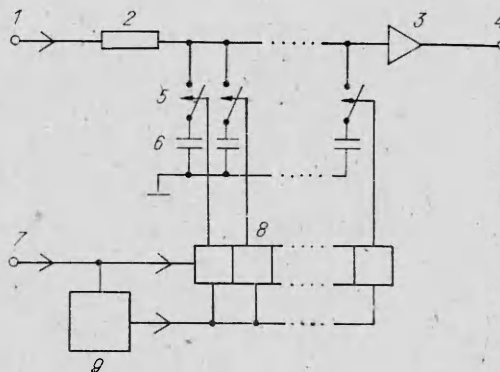


Рис. 2. Блок-схема когерентного фильтра.

ляющей класса ГРЧ в показаниях датчика давления. При этом соблюдается условие синфазности для всех гармоник. Следовательно, когерентный фильтр по схеме рис. 2 можно использовать для реализации алгоритма по рис. 1.

Теоретическая оценка ошибок когерентной фильтрации, имеющих статистическую природу, показала, что необходимо учитывать статистические свойства шумов в проточных камерах сгорания на уровне соответствующих корреляционных функций. В настоящей работе нет места для изложения этих расчетов.

Проведенные расчеты (здесь не приведены) позволяют сделать следующий вывод. В диапазоне условий, обычно имеющих место в экспериментах с проточными камерами сгорания, статистические ошибки несущественны, если постоянная времени когерентной фильтрации в сотни раз больше периода вращения ротора лопаточного агрегата.

При реализации данной методики помимо статистических возможны также ошибки за счет ограниченного числа интегрирующих ячеек N . В результате моделирования на ЭВМ установлено, что ошибки этого рода несущественны при условии, если число ячеек по крайней мере на порядок больше номера наивысшей гармоники роторной частоты, которая еще присутствует в составе сигнала датчика давления.

В заключение этого раздела отметим, что некоторые зарубежные фирмы выпускают под различными названиями (*Waveform educator, Averager*) приборы для исследования повторяющихся процессов, содержащие основные элементы схемы рис. 2, за исключением умножителя частоты.

Методика разрешения альтернативы ЛУШ — НУШ и оценка показателя затухания для сигнала класса ЛУШ

Выбор для данной цели довольно сложного с точки зрения инструментальной алгоритма, о котором далее пойдет речь, явился следствием двух существенных обстоятельств. Одно из них — необходимость изучать тонкие свойства узкополосных колебаний на фоне сравнительно мощной аддитивной широкополосной помехи; другое — многообразие мыслимых механизмов генерирования колебаний класса НУШ. Эти обстоятельства не позволили использовать некоторые известные приемы распознавания узкополосных колебаний и, в частности, известный алгоритм Рытова [1].

Теоретическую основу излагаемой методики составляют следующие положения корреляционной теории нормально распределенных узкополосных шумов [2]. Пусть имеется узкополосный сигнал — функция времени вида

$$x(t) = L(t) \cos [\omega_c t + \varphi(t)] = [\lambda(t) + \bar{L}] \cos [\omega_c t + \varphi(t)],$$

где $L(t)$ — низкочастотная огибающая колебаний; ω_c — центральная частота сигнала; $\varphi(t)$ — переменная часть фазы колебаний.

Если множество реализаций сигнала $x(t)$ представляют собой нормальный узкополосный шум, то между корреляционными функциями самого сигнала, его огибающей $\lambda(t)$ и косинусом фазы $\varphi(t)$ существует определенная связь. В удобной форме эту связь можно описать так.

Введем обозначения: $\rho_x(\tau)$ — нормированная к дисперсии огибающая корреляционная функция $R_{xx}(\tau)$; $R_{\lambda\lambda}(\tau)$ — корреляционная функция центрированной огибающей самого сигнала; $R_{\varphi\varphi}(\tau)$ — корреляционная функция косинуса фазы $\varphi(t)$, а также следующие определения:

$$\rho_\lambda(\tau) = 1,53\sqrt{R_{\lambda\lambda}(\tau)/R_{xx}(0)}, \quad (2)$$

$$\rho_\varphi(\tau) = 2,55R_{\varphi\varphi}(\tau)/[1 + 0,13\rho_x^2(\tau) + 0,05\rho_\lambda^4(\tau)]. \quad (3)$$

Применительно к нормальному узкополосному шуму с достаточной для практических целей точностью можно написать²

$$\rho_x(\tau) = \rho_\lambda(\tau) = \rho_\varphi(\tau). \quad (4)$$

С диагностической точки зрения двойное тождество (4) — необходимый признак стационарного нормального узкополосного шума (и, следовательно, колебаний класса ЛУШ). Для изучения вопроса о достаточности составлен перечень механизмов генерирования колебаний класса НУШ, которые, согласно теоретическим представлениям, могут реализоваться при горении в проточных камерах. В рамках этого перечня исследовали соотношения между функциями, входящими в тождество (4). Для некоторых рассмотренных механизмов в литературе имеются готовые аналитические решения; для других прибегали к методам электронного моделирования.

Итог исследования можно выразить в виде следующего предложения: рассматривать выполнение тождества (4) не только как необходимое, но и как достаточное условие принадлежности узкополосного шума в проточной камере сгорания классу ЛУШ. Более того, на изученном множестве механизмов свойством достаточности обладает и выполнение только одного из тождеств $\rho_x = \rho_\lambda$ или $\rho_\varphi = \rho_\lambda$ (но не $\rho_x = \rho_\varphi$, которое может иметь место и для некоторых колебаний класса НУШ).

Важно, что основанная на таких критериях процедура распознавания совместима с операцией выделения одной узкополосной составляющей из многокомпонентного шума посредством селективного фильтра «с конечной памятью»³ или близкого по свойствам фильтра с частотно-амплитудной характеристикой в форме кривой Гаусса⁴. Если с помощью подобных фильтров выделяют узкополосный шум класса ЛУШ, то отфильтрованный сигнал остается нормально распределенным и на него распространяется тождество (4). Влияние самого фильтра и широкополосной помехи в полосе его прозрачности отражается на функции $R_{xx}(\tau)$ только в области значений ее аргумента $0 \leq |\tau| \leq \tau_\phi$; при $|\tau| > \tau_\phi$ функция $R_{xx}(\tau)$ имеет экспоненциально-гармонический вид, подобный таковому для соответствующего члена выражения (1) (рис. 3). Величину показателя затухания находят экспоненциальной аппроксимацией эмпирической зависимости $\rho_x(\tau)$ в области $|\tau| \geq \tau_\phi$.

Если отфильтрованный сигнал принадлежит классу НУШ, то кривые ρ_x , ρ_λ и ρ_φ расходятся, причем расхождение может иметь место и при $|\tau| < \tau_\phi$. Четкость распознавания по данному критерию зависит от статистических ошибок трех корреляционных преобразований. Для сигналов класса ЛУШ среднеквадратичные ошибки оценки $R_{xx}(\tau)$ и $\tilde{R}_{\lambda\lambda}(\tau)$, норми-

² В справедливости этого соотношения можно убедиться, рассмотрев формулы (8.15) и (8.92) в [2].

³ У линейного фильтра с конечной памятью импульсная переходная характеристика принимает отличие от нуля значения лишь на конечном интервале значений аргумента $0 \leq t \leq \tau_\phi$, где τ_ϕ — память фильтра [3].

⁴ «Гауссовский» фильтр реализуем средствами аналоговой техники в виде резонансного усилителя с числом каскадов не менее пяти, выполненных на одинаково настроенных одиночных колебательных контурах. Величину τ_ϕ для него определяют как $\tau_\phi \approx 1/\Delta f_\phi$, где Δf_ϕ — полоса пропускания фильтра на уровне 0,7.

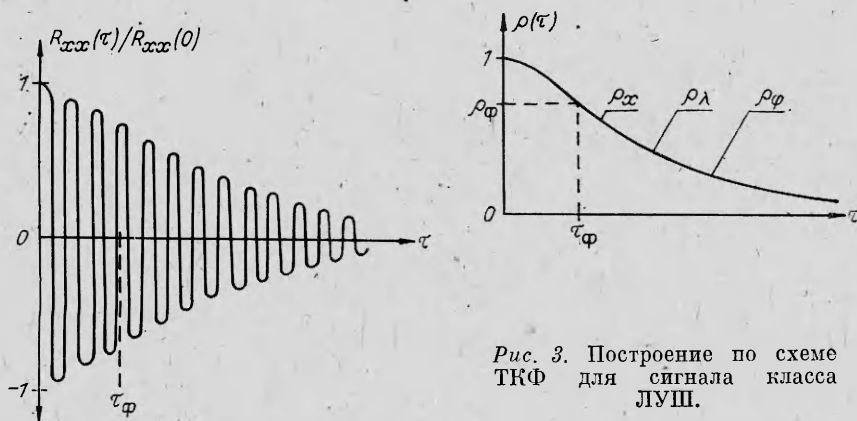


Рис. 3. Построение по схеме ТКФ для сигнала класса ЛУШ.

рванные к соответствующим дисперсиям $R_{xx}(0)$ и $R_{\lambda\lambda}(0)$, определяются величиной $\sqrt{1/\beta T}$ [3]; для $R_{\varphi\varphi}(\tau)$ ошибка примерно в 1,7 раза больше. При заданных β и T влияние ошибок на четкость распознавания, и на точность оценки β тем слабее, чем больше величина $\rho_\varphi = \rho_x(\tau_\varphi)$ (см. рис. 3). Последняя зависит от точности настройки фильтра на центральную частоту сигнала, от полосы пропускания фильтра и от мощности широкополосной помехи. Причем в случае сигнала класса ЛУШ имеется оптимальная по критерию $\max\{\rho_\varphi\}$ полоса пропускания фильтра, которую подбирают эмпирически.

Оценка статистических ошибок с учетом определений (2) и (3) — неременная часть распознавания по изложенной схеме «трех корреляционных функций» (схема ТКФ). Из сказанного выше ясно, что при заданных свойствах сигнала снизить ошибку можно только за счет соответствующего увеличения времени осреднения T . Что касается самой процедуры оценки ошибок, то универсальным можно признать эмпирический способ. Сигнал длительностью T разбивают на несколько интервалов и производят на каждом из них три соответствующих корреляционных преобразования. Затем находят среднеквадратичный разброс результатов и наносят ошибки на построение по схеме ТКФ с учетом преобразований (2) и (3).

Если установлена принадлежность сигнала классу ЛУШ, относительную среднеквадратичную точность оценки β можно найти теоретически из соотношения

$$\sigma_\beta/\beta \approx 1,7/\rho_\varphi \cdot \sqrt{1/\beta T}$$

при условии, что оценку выполняют по эмпирической зависимости $\rho_x(\tau)$ в области $|\tau| \geq \tau_\varphi$ методом наименьших квадратов.

Методика распознавания внутри класса НУШ

Эта неразрешимая в общем случае (при произвольном сигнале класса НУШ) задача рассматривается здесь в единственно реалистичной постановке: насколько возможно снизить исходную неопределенность в отношении изучаемого механизма и, в частности, считать позитивным результатом распознавания даже заключение негативного характера, что фактический механизм не соответствует некоторой гипотетической модели. При этом допускается, что в некоторых случаях распознавание носит исчерпывающий (однозначный) характер.

Основу методики составляет схема ТКФ. О механизме генерирования сигнала класса НУШ судят по характеру расхождения эмпирических зависимостей $\rho_x(\tau)$, $\rho_\lambda(\tau)$ и $\rho_\varphi(\tau)$, привлекая для соответствующей «децифровки» аналитические методы и методы электронного моделирования.

Проиллюстрируем данную методику на примерах распространенных на практике ситуаций, в которых распознавание обеспечивает высокую степень определенности заключений.

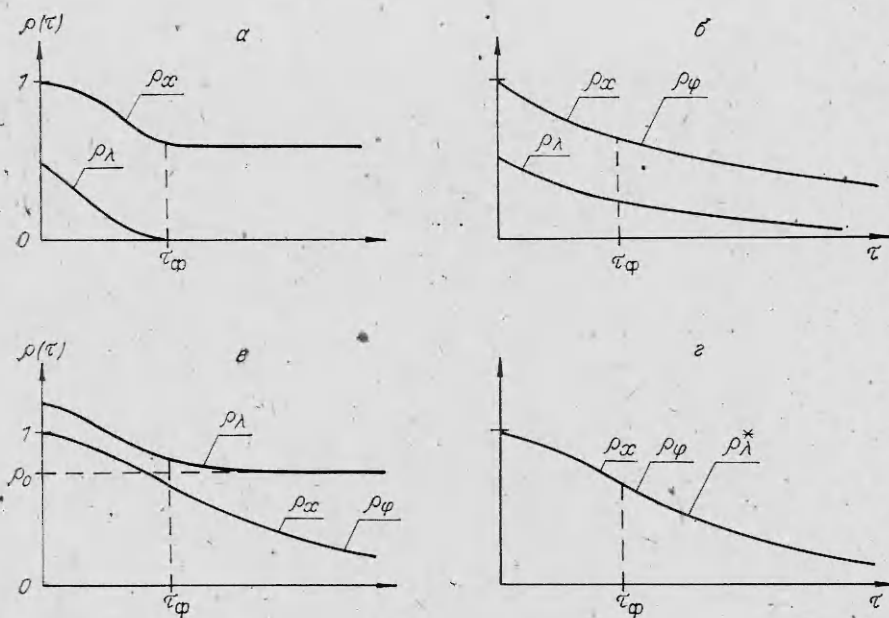


Рис. 4. Результаты построения по схеме ТКФ для некоторых сигналов класса НУШ.

На рис. 4, а выполнено построение по схеме ТКФ для случая, когда в полосе прозрачности фильтра имеются широкополосный шум и гармонические колебания. Последние могут возникать за счет автоколебательных процессов или представлять собой сигнал класса ГРЧ. Соответствующие диагностические признаки ($\rho_x(\tau_\Phi) > 0$; $\rho_\lambda > 0$ для $|\tau| \leq \tau_\Phi$; $\rho_\lambda = 0$ для $|\tau| > \tau_\Phi$) обладают свойством необходимости и достаточности.

Рис. 4, б относится к автоколебаниям, предельный цикл которых динамически возмущен широкополосным шумом. Соответствующее аналитическое решение для частного случая автогенератора томсоновского типа (квазилинейный квазиконсервативный осциллятор) содержится в [1]. Однако методом электронного моделирования те же диагностические признаки ($\rho_x(\tau) = \rho_\phi(\tau)$; $\rho_x(\tau_\Phi) > \rho_\lambda(\tau_\Phi) > 0$) подтверждены для более широкого класса автогенераторов, например с нелинейностью релейного типа. В то же время среди множества других форм колебаний класса НУШ, изученных при выполнении настоящих исследований, не удалось найти ни одной, которая отвечала бы названным признакам. Это дает известные основания рассматривать их в практических исследованиях как признаки необходимого и достаточного типа.

Рис. 4, в, г относится к линейному механизму формирования узкополосных колебаний из широкополосного шума, однако при условии, что либо показатель затухания β , либо мощность широкополосного шума совершают случайные колебания во времени. Характерное время такого рода нестационарности предполагается меньше времени осреднения T , но существенно больше масштаба затухания $1/\beta$. Аналитическими методами и на электронных моделях установлено, что в этом случае имеет место примерное тождество⁵ $\rho_x = \rho_\phi$ и одновременно неравенство $\rho_x < \rho_\lambda$. Названные особенности, однако, присущи и нелинейным механизмам генерирования узкополосных шумов. Отмеченная неопределенность в существенной мере преодолевается, если ввести в рассмотрение вспомогательную функцию

$$\rho_\lambda^* = \sqrt{\rho_\lambda^2(\tau) - \rho_0^2}$$

(Смысл величины ρ_0 вытекает из построения на рис. 4, в.) Если меха-

⁵ Теоретически возможные нарушения этого тождества обычно лежат в пределах статистических ошибок корреляционного анализа.

низм формирования линейный и соответствует указанной модели, выполняется тождество $\rho_{\lambda}^* = \rho_x = \rho_{\phi}$ (см. рис. 4, *г*). Для иных изученных механизмов оно не имеет силы.

Таким образом, в работе введена система классификации узкополосных колебаний давления в проточных камерах сгорания по признакам механизмов их генерирования. Сформулированы помехоустойчивые алгоритмы распознавания узкополосных колебаний в рамках этой системы. Описан алгоритм оценки параметров устойчивости горения (показателей затухания собственных колебаний), основанный на статистическом анализе узкополосных шумов, которые по результатам распознавания сформированы линейно-стационарным образом из широкополосных турбулентных пульсаций.

Поступила в редакцию 30/VI 1983

ЛИТЕРАТУРА

1. С. М. Рытов. Введение в статистическую радиофизику. М.: Физматгиз, 1966.
2. Б. Р. Левин. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Советское радио, 1969.
3. Д. Бендат. Основы теории случайных шумов и ее применения. М.: ИЛ, 1965.
4. В. С. Пугачев. Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления. М.: Физматгиз, 1962.
5. М. Г. Серебренников, А. А. Первозванский. Выявление скрытых периодичностей. М.: Наука, 1965.

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ НЕКОТОРЫХ ТЕРМИТНЫХ И ИНТЕРМЕТАЛЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Э. А. Бугакова, А. Г. Струнина
(Черноголовка)

Малогозовые термитные и интерметаллические составы, спрессованные из порошков, находят широкое применение в технике. Смеси, разбавленные продуктами реакции¹, используются при кинетических исследованиях [2] и в качестве модельных при изучении переходных режимов горения [3] и разнообразных нестационарных явлений в горении [4].

Данные по теплофизическим параметрам этих систем, их зависимости от состава, плотности запрессовки, дисперсности компонентов практически отсутствуют. Лишь в работах [1, 5] есть некоторые сведения о теплопроводности и температуропроводности железо- и хромоалюминиевых термитов, а изучение структуры тепловых волн взаимодействия переходных металлов с кремнием и бором [6, 7] сопровождалось измерением и расчетом теплофизических параметров на различных стадиях взаимодействия.

Ниже представлены данные по теплопроводности и температуропроводности ряда систем, имеющих различную степень разбавления продуктами реакции, плотность, дисперсность и форму компонентов.

Исследуемые составы готовили аналогично [3]. В опытах использовали цилиндрические таблетки диаметром 15 и высотой ~4,5 мм. Теплофизические параметры определяли скоростным методом двух температурно-временных интервалов [8]. Необходимый перепад температур по высоте (~30°) создавали, притирая таблетку маслом к медной пластинке, омываемой снизу потоком термостатированной воды. Для исключения возможности проникновения притирочного масла в поры торец покрыва-

¹ Метод разбавления [1] позволяет снижать температуру горения исследуемого состава, не усложняя физико-химическую природу процесса, и широко применяется при изучении закономерностей горения.